

基于球面参数化的点模型渐变

王仁芳^{1,2)} 张三元¹⁾ 叶修梓¹⁾

¹⁾(浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310027) ²⁾(浙江万里学院计算机与信息学院, 宁波 315100)

摘要 为了获得光滑自然的点模型渐变效果,基于球面参数化,提出了一种鲁棒的渐变算法。该算法首先对源和目标模型进行球面参数化,使得参数化后的模型嵌入到单位球面上;然后在球面上自适应地对齐模型间的相应特征点,并将球面映射到矩形参数域上,基于该域建立模型间各采样点的对应关系;接着在渐变过程中,采用拉普拉斯算子计算出中间点模型的几何位置,以保持模型的细节;最后利用移动最小二乘曲面进行动态上采样,以消除中间模型的裂缝。实验结果表明,该算法具有良好匹配的采样点对应和光滑的渐变过程。

关键词 点模型 球面参数化 拉普拉斯算子 渐变 移动最小二乘曲面

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)03-0552-08

Morphing of Point-sampled Geometry Based on Spherical Parameterization

WANG Ren-fang^{1,2)}, ZHANG San-yuan¹⁾, YE Xiu-zi¹⁾

¹⁾(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

²⁾(College of Computer Science and Information Technology, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100)

Abstract Morphing of point-sampled geometry is one important research area in the field of computer animations. Based on spherical parameterization, we put forward a robust morphing of point-sampled geometry. Source and target models represented by point-sampled geometry are first parameterized onto a sphere, respectively. After aligning the corresponding features of two models on their spheres, two spheres are projected onto a common rectangle-parameter domain and the correspondence between sample points on the two models is built using this rectangle domain. In order to preserve the geometric details of point set surfaces, the absolute geometry of the in-between models is computed by means of Laplacian operator and is dynamically up-sampled using a moving least square method so as to eliminate the cracks. Experiment results demonstrate that our algorithm can preserve the geometric details very well and produce a smooth transition sequence.

Keywords point-sampled geometry, spherical parameterization, Laplacian operator, morphing, moving least square surface

1 引言

近年来,点模型的数字几何处理受到了越来越多的关注,国内外相关学者对点模型的表示、建模、处理和绘制也做了大量的研究工作,并取得了相应

成果。点模型的渐变是一项富有挑战性的课题,因此如何有效地对点模型进行渐变已成为计算机动画领域的一个研究热点。

由于基于网格的表示一直是计算机图形学中模型表示的主流,所以研究网格模型渐变(MM)的工作较多。1991年,Kent等人实现了零亏格多面体的

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA01Z311, 2007AA04Z1A5);浙江省教育厅科研项目(Y200805211)

收稿日期:2007-03-25;改回日期:2007-08-14

第一作者简介:王仁芳(1974~),男,浙江万里学院讲师。2008年于浙江大学计算机科学与技术学院获博士学位。主要研究方向为虚拟现实、数字几何处理。E-mail:wrfwpln@126.com

渐变^[1],他们首先把两个多面体上的点都投影到单位球上,并借助于单位圆建立了两个物体间的空间拓扑结构对应关系;然后通过线性插值得到中间过渡物体模型。继后出现了多种 MM 方法,如平面参数化法^[2]、球面参数化法^[3]以及流形参数化法^[4]等,MM 方法的相关综述可参阅文献[5]。然而,网格模型在渐变过程中,常出现面片翻转和面片扭曲现象以及需要维护全局一致的拓扑结构,但点模型的固有属性,使其消除了这些缺陷,可见点模型的渐变比 MM 方法更具优势。

与 MM 方法相比,点模型渐变的研究工作很少,按照渐变路径的产生方式,点模型的渐变可分为基于物理的渐变和基于几何的渐变两种。其中基于物理的渐变需要建立相关的物理模型,其中间过渡点模型可根据能量方程得以求解。由于这种渐变在一定程度上模拟了真实的物理现象,因此得到了相关研究者的关注^[6],并成为点模型渐变的一个热门研究分支。基于几何的渐变是通过对源和目标模型进行几何变换来获得中间过渡模型的,如线性插值^[7-8]等。总的来说,基于物理的渐变比基于几何的渐变要复杂得多,且计算量大、效率低。

基于几何的点模型渐变研究工作极少,Čmolič 等人写了一篇技术报告^[7],该文提供了几种将点模型进行聚类的方法,即先对源和目标模型分别建立二叉树,再在两个二叉树的结点间建立对应关系,但该方法在渐变过程中会产生大量的裂缝和小洞。Xiao 等人提出了一种基于平面参数化的零亏格点模型渐变算法^[8],他们先使用 Floater 等人提出的无

网格参数化方法^[9]将零亏格点模型映射到圆形的参数域上,再通过旋转该参数域来对准特征点并建立源和目标模型间的对应关系。虽然该方法避免了前者出现的裂缝现象,然而该平面参数化方法的前提是需要点在模型上确定一条边界;尽管 Xiao 等人通过利用 Level Set 的方法解决了这一问题^[10],但在点模型上确定一条边界绝不是一件平凡的工作。此外,因两者都是通过线性插值来获得中间模型,故致使中间模型的细节不够充分。

本文从几何变换的角度出发,提出了一种鲁棒的零亏格点模型渐变算法。对于零亏格的模型,由于单位球面是一个更为理想和自然的参数域,因此本文首先对点模型进行球面参数化;然后在球面上对齐特征点并建立模型间的对应关系;最后采用拉普拉斯算子计算出中间点模型的几何位置,以保持模型的细节,并利用移动最小二乘曲面(MLS)来进行动态重采样,以消除中间模型的裂缝。图1显示本文算法能够生成光滑的渐变效果(本文点模型的图示均采用点绘制技术绘制而成),图2列出了该算法的总流程。

2 点模型的球面参数化

零亏格模型在拓扑结构和球面是等价的,因此近年来出现了多种网格模型球面参数化的方法。尽管点模型不存在网格模型的拓扑关系,但通过点的 k -最近邻域可得到与网格类似的图结构,于是就能够进行相应的球面参数化。Zwicker 和 Gotsman 首次提出直接球面参数化点模型^[11],并利用球面上

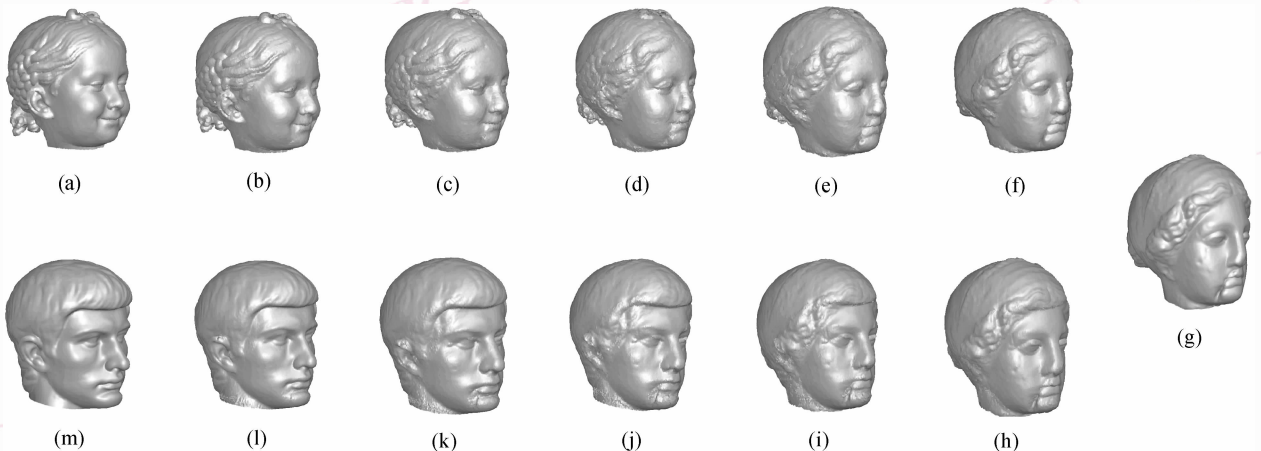


图1 点模型 Bimba、Igea 和 David 头像之间的渐变(14 个特征点)

Fig. 1 Morphing from Bimba to Igea to David with 14 features

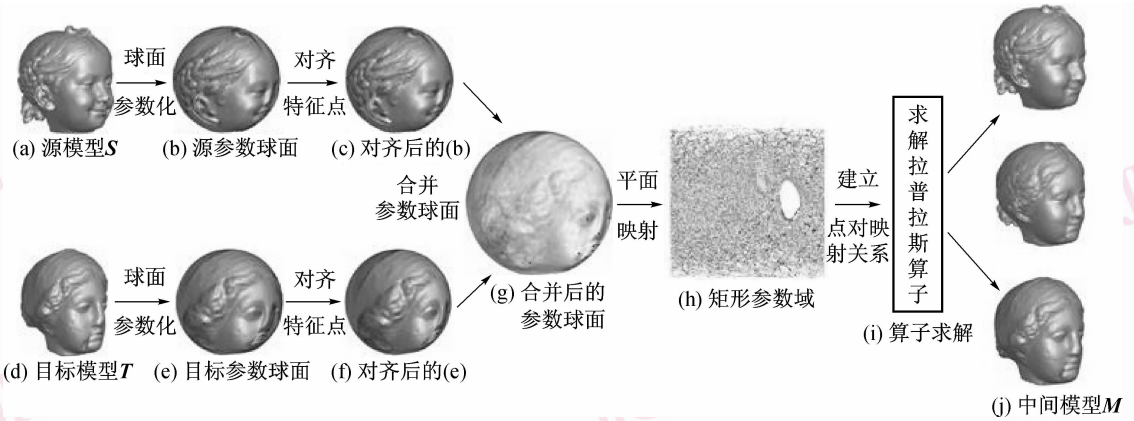


图 2 本文算法总流程

Fig. 2 Overview of the algorithm

网格的拓扑关系来重建输入点云的三角网格。下面对点模型的球面参数化做简要的介绍。

Gu 等人使用 Laplace-Beltrami 算子将平面图嵌入到球面上^[12],该算子本质上是拉普拉斯算子的切分量。对于点模型 V , s_i 为采样点 p_i ($p_i \in V$) 嵌入到球面上的点,则 s_i 的拉普拉斯算子为

$$L_i = \sum_{j \in N(p_i)} w_{i,j} (s_i - s_j) \quad (1)$$

式中, $N(p_i)$ 为采样点 p_i 的 k -最近邻域中所有点的下标集; $w_{i,j}$ 为权值 (权值的选取会在一定程度上影响球面参数化的扭曲程度), 本文取 $w_{i,j} =$

$$\frac{1}{\|p_i - p_j\|} \bigg/ \sum_{j \in N(p_i)} \frac{1}{\|p_i - p_j\|}.$$

由于点模型被参数化在单位球面上,所以 Laplace-Beltrami 算子可近似为拉普拉斯算子的切分量,即

$$L_i^p = L_i - (L_i \cdot N_i) N_i \quad (2)$$

式中, $N_i = s_i / \|s_i\|$ 。Gu 和 Gotsman 等人证明了球面参数化的目标方程^[12]是

$$\forall i, L_i^p = 0 \quad (3)$$

该方程可通过如下的迭代算法求解:

(1) 初始化: $s_i = p_i$ 。

(2) 计算点模型 V 的中心 $c = \sum_i s_i / n$ ($n = |V|$)。

(3) 平移 $s_i = s_i - c$, 并将点 s_i 投影到单位球面上 $s_i = s_i / \|s_i\|$ 。

(4) $\forall i: s_i = s_i + \lambda L_i^p$ 并将 s_i 标准化 $s_i = s_i / \|s_i\|$ 。

(5) 判断是否已经收敛: $\forall i$, 若 $\max(\|L_i^p\|) >$

ε , 则转步骤(2)。

其中 λ ($0 < \lambda < 1$) 为调节参数。图 2(b)、图 2(e) 分别为点模型 Bimba、Igea 的球面参数化效果图。

3 点模型的渐变

本文渐变算法概述如下: 首先将源模型 S 和目标模型 T 球面参数化之后, 再旋转目标球面, 并分别自适应地移动相应特征点及其周围的局部邻域, 以精确地对应用户指定的特征点; 然后将两个球面映射到同一个矩形参数域上, 并基于该矩形域建立模型间各采样点的对应关系; 最后利用拉普拉斯算子来求解中间点模型, 并采用 MLS 方法来上采样中间点模型的欠采样区域。

3.1 特征点对齐

设 P^S, P^T 分别是源模型 S 和目标模型 T 参数化球面上的点集, F^S, F^T 分别是两个模型上相对应的特征点各自的参数点集 (且 $|F^S| = |F^T|$); s_i^S, s_i^T 分别是点集 P^S, P^T 中的第 i 个点, f_i^S, f_i^T 分别是点集 F^S, F^T 中的第 i 个点, 则特征点对齐就是 $\forall i$ 使得 $s_i^S = s_i^T$ 。本文分初步、精确两步来对齐特征点。

(1) 特征点的初步对齐。用户指定的特征点的初步对齐实质上就是对源模型和目标模型进行大致一致的姿态调整, 本文通过旋转参数球面来实现, 即旋转目标模型点集 P^T 使得点集 P^S 和 P^T 中相应特征点的距离平方和取得最小值。设四元数 $q = [\cos\alpha, n\sin\alpha]$ (n 为过球心的单位矢量) 即物体 V (即点模型 V) 绕 n 旋转 2α 角 (记为 $R_q(V)$), 则特征点的初步对齐就转化为下式的求解:

$$q = \arg \min_q \sum_{i=0}^{|F^T|-1} \|R_q(s_{f_i}^T) - s_{f_i}^S\|^2 \quad (4)$$

这是一个非线性最小二乘问题,利用高斯-牛顿法可快速求解;然后执行 $R_q(P^T)$ 即可实现特征点的初步对齐。

(2)特征点的精确对齐。初步对齐并未使得特征点精确重合,Xiao 等人通过线性地移动源特征点及其周围局部的点,以使对应的特征点尽可能地重合^[8],然而由于线性的移动会使特征点的局部邻域发生较大的扭曲。为此,本文提出了一种自适应地移动局部邻域的方法用来解决这一问题。

设 $d = (s_{f_i}^T - s_{f_i}^S)/2$,为使 $s_{f_i}^S = s_{f_i}^T$,本文沿 d 的方向平移点 $s_{f_i}^S$ 到点 c (如图3所示),同时点 $s_{f_i}^T$ 沿 $-d$ 的方向平移到点 c ,平移距离均为 $\|d\|$,则特征点移动时在球面上的影响区域 Ω_r 是以 $r = 2\|d\|$ 为半径的圆,且该区域内其他点 x_j 沿 d 或 $-d$ 方向平移的距离 d_{x_j} 由下列高斯函数决定:

$$d_{x_j} = \|d\| e^{-\|x_j - s_{f_i}\|^2/h^2} \quad (5)$$

本文取 $h = r/3$,如此则仅仅 Ω_r 内的点有位移,且边界圆上点的位移近似为零。这相当于在距离场中,给 Ω_r 中的粒子施加大小不同的推力,于是粒子就沿场的方向移动相应的位移。特征点对齐后的参数球面如图2(c)和图2(f)所示。

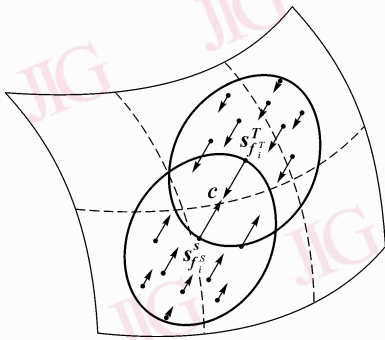


图3 特征点局部邻域的自适应移动
Fig.3 Adaptively moving the neighbors

3.2 模型间采样点对应关系的建立

本文首先将特征点对齐后的两个参数球面(表示为 $(1, \theta, \varphi)$ ($0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \varphi \leq \pi$))进行合并(如图2(g)所示),并将其参数化到矩形域 $G: [0, N] \times [0, N]$ 上(如图2(h)所示);然后,在矩形域 G 上建立源和目标模型间各采样点的对应关系 $R = \{(s_i, t_j) | s_i \in S, t_j \in T\}$,具体算法如下。

设 $G_S = \{g_1^S, g_2^S, \dots, g_{|S|}^S\}$ 和 $G_T = \{g_1^T, g_2^T, \dots, g_{|T|}^T\}$ 分别是源模型 S 和目标模型 T 在矩形域 G 上的点集,点 $g_i^S = (x_s, y_s)$ 与点 $g_j^T = (x_t, y_t)$ 之间的距离 $d_c(g_i^S, g_j^T)$ 为棋盘距离,且 $d_{\max}^S = \max_{i \in N, j \in S(p_i)} (g_i^S, g_j^S)$ 与 $d_{\max}^T = \max_{i \in T, j \in N(p_i)} (g_i^T, g_j^T)$;又设 g_i^S 的对应点的搜索范围是以 g_i^S 为中心、 $w_T d_{\max}^T$ 为半边长的方形区域 A_i^S, g_i^T 对应点的搜索范围是以 g_i^T 为中心、 $w_S d_{\max}^S$ (w_T, w_S 为正权重)为半边长的方形区域 A_i^T 。不妨设 $|S| \leq |T|$,建立对应关系 R 的步骤如下:

- (1)初始化:置 $\forall g_i^S, \forall g_j^T$ 的状态为 Empty。
- (2)对于 $\forall g_i^S$:若 A_i^S 内存在状态为 Empty,且 $d_c(g_i^S, g_j^T)$ 最小的点 g_j^T ,则匹配 (g_i^S, g_j^T) ,且置 g_j^T 的状态为 Occupied;否则将点 g_i^S 与 $d_c(g_i^S, g_j^T)$ 为最小的 g_j^T 相匹配。
- (3)若存在状态为 Empty 的 g_j^T ,则在 A_i^T 内用第2步的方法建立对应关系。
- (4)将 (g_i^S, g_j^T) 的对应关系映射回到源模型 S 和目标模型 T 中,便形成 R 。

3.3 中间点模型的生成

Čmolík 和 Xiao 等人通过线性插值来获得中间模型^[7-8],然而该方法不能充分地保持中间模型的细节。拉普拉斯算子的操作能够充分保持曲面的细节,近年来已被广泛地应用到网格曲面的造型和编辑^[13]中;本文通过引入拉普拉斯算子来求解中间点模型,使其细节保持充分,以产生过渡自然的渐变效果。

取式(1)中的 $w_{i,j} = 1/(|N(p_i)| - 1)$ (即为一常量 c),便可计算出 $s_i \in S, t_i \in T$ 的拉普拉斯微分矢量 ξ_i^S, ξ_i^T 。设 $\delta_S = (\xi_0^S, \xi_1^S, \dots, \xi_{|S|-1}^S)^T, \delta_T = (\xi_0^T, \xi_1^T, \dots, \xi_{|T|-1}^T)^T$,则有

$$L_S S = \delta_S, L_T T = \delta_T \quad (6)$$

其中, $L_S = I - cK_S, L_T = I - cK_T, K_S, K_T$ 分别为源模型 S 和目标模型 T 中 k -最近邻域关系矩阵。因此,由下式可求出中间模型 M :

$$L_M M = \delta_M \quad (7)$$

然而因拉普拉斯矩阵 L 是稀疏的奇异矩阵^[13],故式(7)在解析上是无解的;为使式(7)有解,应至少确定一固定点 f_k^M ,并将其加到方程中,使该方程成为超定的,即将行 $(0, 0, \dots, 1, 0, \dots, 0)$ (第 k 列为1)追加到 L_M 中,将 f_k^M 追加到 δ_M 中,则式(7)转化为

$$\tilde{L}_M M = \tilde{\delta}_M \quad (8)$$

为使式(8)有确定的解,可将其变换为

$$\tilde{L}_M^T \tilde{L}_M M = \tilde{L}_M^T \delta_M \quad (9)$$

上式的左侧为 $n \times n$ 大小的大型稀疏矩阵, Tauc库^[14]是一种大型稀疏线性方程系统的加速求解工具,因此一旦确定了 f_k^M 、 δ_{M_i} 及 K_{M_i} ,便可由该库求出 M_i (t 为时间序列)。设 f_i^S 和 f_i^T 是与源模型 S 和目标模型 T 对应的特征点,将它们的夹角做 t 时刻的线性插值后所得到的过渡点作为 f_k^M ;同样的方法插值 δ_i^S 和 δ_i^T 得到 δ_{M_i} ,并插值求出任一 M_i ,同时将其 K_{M_i} 作为全局的 K_M ,由此求出 M_i 。

3.4 动态重采样

在点模型的渐变过程中,应对中间模型的欠采样区域进行上采样,以消除可能出现的裂缝。与 Xiao 等人提出的方法^[8]相似,本文采用 MLS 进行动态重采样。MLS 通过采用局部高阶多项式为给定的离散采样点提供一个逼近或插值曲面。

给定点集 P ,其 MLS 曲面 $S_{MLS}(P)$ 是根据投影算子 $\psi: B \rightarrow R^3$ 隐式地被定义的,该投影算子将 $S_{MLS}(P)$ 定义域 B 附近的点投影到该曲面上,并由所有投影后的点定义 $S_{MLS}(P)$,即 $S_{MLS} := \{x \in B: \psi(x) = x\} = \text{range}(\psi)$ 。投影的计算 $r \mapsto \psi(r)$ 分成以下 3 步:

(1) 对任意具有 $n = n(a) = \frac{r-a}{\|r-a\|}$ 的 $n, a \in R^3$,

首先找到局部参考平面 $H = \{x \in R^3: n^T x = n^T a\}$ 并使如下非线性能量函数最小(其中 $\theta(d) = e^{-d^2/h^2}$):

$$E_{MLS}(a, n) := \sum_i (n^T p_i - n^T a)^2 \theta(\|p_i - a\|) \quad (10)$$

(2) 通过对点 p_i 的邻域点 $p_{i,j}$ 进行加权最小二乘拟合来找到局部双变量多项式逼近 $g: H_r \rightarrow R^3$ 。设点 $q_{i,j}$ 是点 $p_{i,j}$ 到 H_r 上的正交投影, (x_i, y_i) 是它的局部 2 维坐标,如果 $f_i := \|q_{i,j} - p_{i,j}\|$ 是它在 H_r 上的高度,则应使如下误差最小:

$$\sum (g(x_i, y_i) - f_i) \theta(\|p_{i,j} - p_i\|) \quad (11)$$

(3) 点 r 的投影最后被定义成 $\psi(r) := a + g(0,0) \cdot n$ 。详细过程参见文献[15]。

将采样点 p_i 处的局部采样密度定义为 $\rho_i = k/r^2$, r 为采样点 k -最近邻域包围球的半径。设 ρ_k^M 、 ρ_i^S 与 ρ_j^T 分别为中间模型 M 、原模型 S 及目标模型 T 中点 $m_{k,t}$ ($m_{k,t} \in M_i$)、点 s_i 与点 t_j 处的局部采样密度,若 $\rho_k^M < \tau((1-t)\rho_i^S + t\rho_j^T)$ (τ 为调节参数,且时刻 $t \in [0,1]$),则借助于 $g(x,y)$ 对 $m_{k,t}$ 的邻域进行上采样。图 4 为一个重采样实例,图 4(a)所示为当 $t = 0.12$ 时由 Bimba 渐变到 Igea 有裂缝的中间点模型,上采样该模型后的效果如图 4(b)所示。



(a) 有裂缝的中间模型



(b) MLS重采样后的中间模型

图 4 MLS 重采样消除裂缝的效果

Fig. 4 Eliminating the small cracks by MLS

4 实验结果与分析

本文在 VC++ 7.1 的环境下和在 Microsoft Windows XP PC、P4 2.8 GHz CPU、1 GB RAM 平台上实现了本文的渐变算法。表 1 给出了实验统计数据,图 5~图 7 为不同方法生成的中间点模型比较(特征点相同),图 1 和图 8、图 9 为本文算法所生成

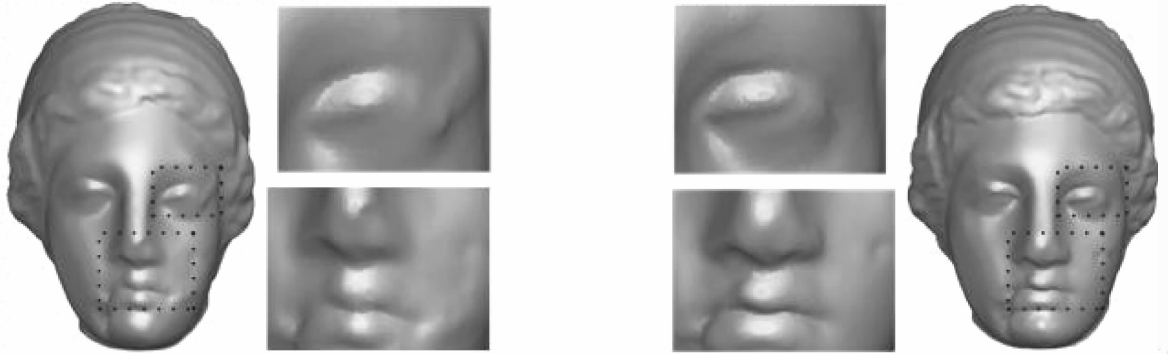
的点模型渐变结果。

图 5 和图 6 所示分别为由 Igea 渐变到 David,当 $t = 0.12$ 和 $t = 0.8$ 时,其中间点模型比较,图 5(a)和图 6(a)分别为采用文献[8]的方法所得到的中间点模型渐变结果,图 5(b)和 6(b)分别为本文算法所得到的中间点模型渐变结果。从图 5 和图 6 的中间点模型的眼睛、嘴等处可以看出,文献[8]的方法产生了较大扭曲,其主要原因是:由于该方法是采用线性

移动特征点局部区域的策略来进行特征点对齐的,而本文采用的则是自适应地移动特征点局部区域的策略,因此,本文的模型间采样点对的匹配性能优于文献[8]的方法,其产生的扭曲变形就小于前者的。

图7所示为由Bimba渐变到Igea,当 $t = 0.3$ 时的中间点模型比较,图7(a)为本文算法通过线性插值得到的中间点模型,图7(b)为本文算法通过拉普

拉斯算子求解得到的中间模型。从图5~图7的中间模型的发、耳和下巴等处可以看出,拉普拉斯算子求解的中间模型比用线性插值得到的中间模型更能保持曲面的细节。因此本文方法对于曲面的细节保持性能优于文献[8]的方法;当然,这是以比较耗时的拉普拉斯矩阵 L 分解为代价的(从表1中分解 L 的执行时间可以看出)。

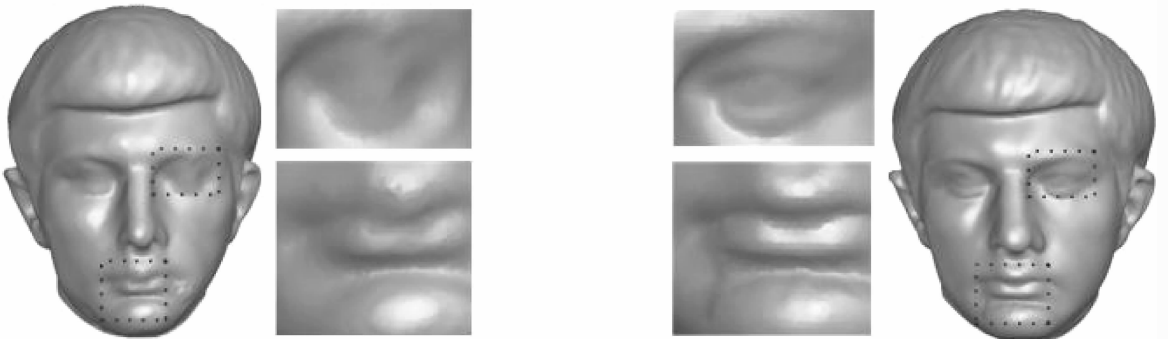


(a) 文献[8]方法得到的中间点模型

(b) 本文方法得到的中间点模型

图5 不同方法生成的中间点模型比较

Fig. 5 Comparison between the in-between models

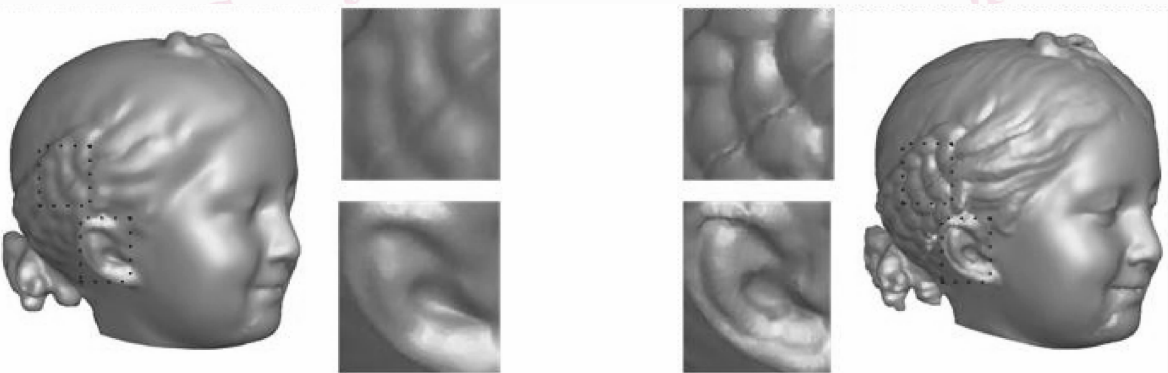


(a) 文献[8]方法得到的中间点模型

(b) 本文方法得到的中间点模型

图6 不同方法生成的中间点模型比较

Fig. 6 Comparison between the in-between models



(a) 线性插值得到的中间点模型

(b) 拉普拉斯算子求解得到的中间点模型

图7 中间点模型比较

Fig. 7 Comparison between the in-between models

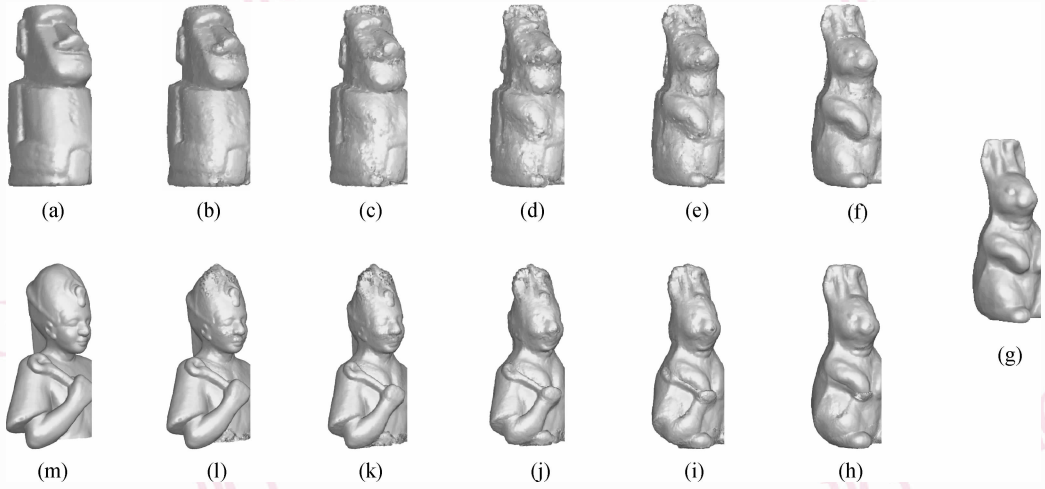


图 8 点模型 Moai、Rabbit 和 Ramesses 之间的渐变(5 个特征点)

Fig. 8 Morphing from Moai to Rabbit to Ramesses with 5 features

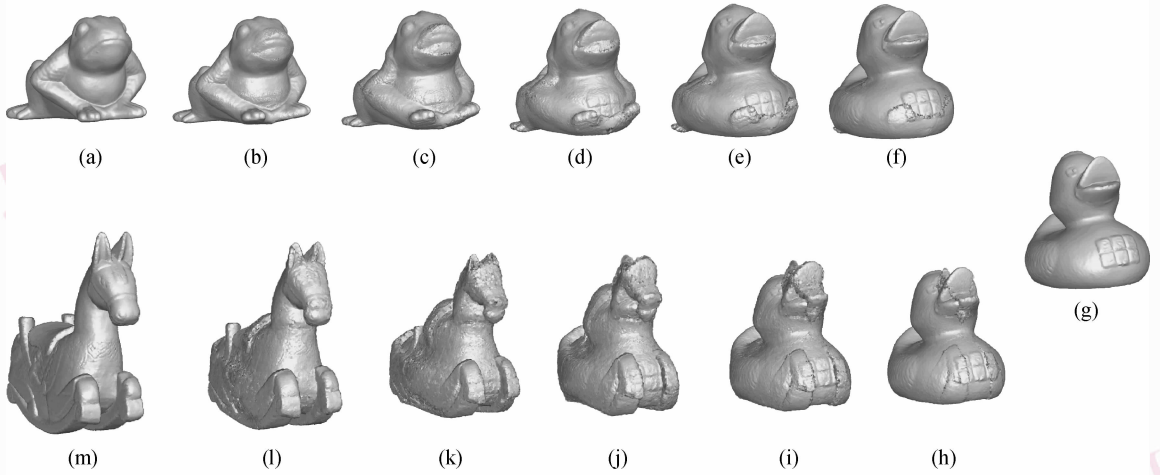


图 9 点模型 Frog、Duck 和 Horse 之间的渐变(4 个特征点)

Fig. 9 Morphing from Frog to Duck to Horse with 4 features

表 1 本文的实验统计数据

Tab. 1 The related experiment data of this paper

3 个点模型 (S, T)	3 个点模型的点数	球面参数化 (ε 取 10^{-3}) 迭代次数/时间 (s)	S, T 特征点 个数/对齐时间 (s)	执行时间 (s)	
				点对数/映射时间	分解 L 时间
Bimba, Igea, David	70 302, 75 706, 74 833	90, 39, 76 / 6. 86, 3. 1, 5. 89	14, 14 / 2. 63, 1. 98	119 404, 120 863 /	111. 95,
				2. 20, 2. 75	127. 08
Moai, Rabbit, Ram	70 511, 67 038, 58 780	88, 110, 264 / 6. 94, 7. 19, 44. 89	5, 5 / 0. 7, 0. 61	110 964, 103 817 /	106. 1,
				0. 63, 0. 58	90. 38
Frog, Duck, Horse	78 865, 73 661, 78 289	63, 210, 114 / 4. 88, 15. 53, 9. 16	4, 4 / 0. 58, 0. 64	126 070, 136 348 /	132. 6,
				1. 3, 1. 22	148. 63

5 结 论

由于网格模型在渐变过程中常出现面片翻转和扭曲现象以及需要维护全局一致的拓扑结构,故使得点模型的渐变成为计算机动画领域的一个研究热点。本文基于球面参数化,提出了一种保持细节特征的零亏格点模型渐变算法。该算法通过在球面上进行旋转和局部自适应的移动操作来精确地对齐相应的特征点,并将球面映射到同一矩形参数域上,以建立模型间各采样点的对应关系,中间模型用拉普拉斯算子求解,并用MLS方法进行动态重采样。实验结果表明,本文的算法具有良好匹配的采样点对应和光滑的渐变过程。

受文献[3]、[4]、[6]的启发,本文未来的工作将集中于:(1)直接在源和目标模型上建立各采样点的对应关系,以避免点模型参数化过程;(2)实现任意亏格的点模型渐变。

参考文献 (References)

- 1 Kent J R, Carlson W E, Parent R E. Establishing correspondences by topological merging: A new approach to 3D shape transformation [A]. In: Proceedings of Graphics Interface'91 [C], HongKong, China, 1991:271-278.
- 2 Gregory A D, State A, Lin M C, *et al.* Feature-based surface decomposition for correspondence and morphing between polyhedra [A]. In: Proceedings of Computer Animation'98 [C], Berlin, German, 1998: 245-248.
- 3 Lee Tong-ye, Yao Chih-yuan, Chu Hung-kuo, *et al.* Generating genus-n-to-m mesh morphing using spherical parameterization [J]. Journal of Visualization and Computer Animation, 2006, **17**(3-4): 433-443.
- 4 Zhang Lei, Liu Li-gang, Ji Zhong-ping, *et al.* Manifold parameterization [A]. In: Proceedings of 24th Computer Graphics International Conference [C], Hangzhou, 2006, **4035**:160-171.
- 5 Alexa M. Recent advances in mesh morphing [J]. Computer Graphic Forum, 2002, **21**(2): 173-196.
- 6 Guo X H, Li X, Bao Y F, *et al.* Meshless thin-shell simulation based on global conformal parameterization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, **12**(3):375-385.
- 7 Čmólk L, Uller M. Point Cloud Morphing [EB/OL]. <http://www.cg.tuwien.ac.at/studentwork/CESCG/CESCG-2003/LCmolik/paper.pdf>,2003.
- 8 Xiao C, Zheng W, Peng Q, *et al.* Robust morphing of point-sampled geometry [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2004, **15**(3-4): 201-210.
- 9 Floater M S, Reimers M. Meshless parameterization for surface reconstruction [J]. Computer Aided Geometric Design, 2001, **18**(2): 77-92.
- 10 Xiao Chun-xia, Feng Jie-qing, Miao Yong-wei, *et al.* Geodesic path computation and region decomposition of point-based surface based on level set method [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, **28**(2): 250-258. [肖春霞, 冯结青, 缪永伟等. 基于 Level Set 方法的点采样曲面测地线计算及区域分解[J]. 计算机学报, 2005, **28**(2): 250-258.]
- 11 Zwicker M, Gotsman C. Meshing point clouds using spherical parameterization [A]. In: Proceedings of Eurographics Symposium on Point-based Graphics'04 [C], Zurich, Switzerland, 2004: 173-180.
- 12 Gu X, Yau S T. Computing conformal structures of surfaces [J]. Communications in Information and Systems, 2002, **2**(2): 121-146.
- 13 Sorkine O, Lipman Y, Cohen-Or D, *et al.* Laplacian surface editing [A]. In: Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing [C], Nice, France, 2004: 179-188.
- 14 Toledo S. TAUCS: a library of sparse linear solvers, version 2. 2. Tel-Aviv University [CP/OL]. <http://www.tau.ac.il/~stoledo/taucs/>, 2003-09-04.
- 15 Alexa M, Behr J, Cohen-Or D, *et al.* Point set surfaces [A]. In: Proceedings of IEEE Visualization [C], San Diego, California, USA, 2001: 21-28.